

## 长期有机无机肥配施提高黑土磷含量和活化系数

王琼<sup>1,2</sup>, 展晓莹<sup>1,3</sup>, 张淑香<sup>1\*</sup>, 彭畅<sup>4</sup>, 高洪军<sup>4</sup>, 张秀芝<sup>4</sup>, 朱平<sup>4</sup>, Colinet Gilles<sup>2</sup>

(1 中国农业科学院农业资源与农业区划研究所/耕地培育技术国家工程实验室, 北京 100081; 2 Gembloux Agro-Bio Tech, University of Liege, Passage des déportés 2, 5030 Gembloux, Belgium; 3 中国农业科学院农业环境与可持续发展研究所, 北京 100081; 4 吉林省农业科学院农业环境与资源研究中心, 长春 130033)

**摘要:**【目的】长期不同施肥模式影响着耕层土壤磷库以及各形态磷的变化。研究不同施肥模式下黑土各磷素形态含量及有效性的变化, 为黑土的肥力培育和合理施用磷肥提供理论依据。【方法】黑土长期定位施肥试验位于吉林省公主岭市, 始于 1990 年, 供试作物是连作玉米。肥料试验包括不施肥对照 (CK)、施氮、钾肥 (NK)、氮磷钾平衡施肥 (NPK)、氮磷钾 + 有机肥 (NPKM) 共 4 个处理。化肥处理施氮肥 (N) 165 kg/hm<sup>2</sup>、磷肥 (P) 36 kg/hm<sup>2</sup>、钾肥 (K) 68 kg/hm<sup>2</sup>、猪粪 21 t/hm<sup>2</sup>, NPKM 处理的最终 N-P-K 养分投入量为 165–75–145 kg/hm<sup>2</sup>。选取了 1990、1995、2000、2005 和 2010 年的土样, 采用 Hedley 连续浸提法, 分析了土壤全磷、有效磷及各有效磷形态含量, 计算了土壤磷活化系数 (PAC)。【结果】与初始年份相比, NPKM 处理土壤全磷、有效磷和磷活化系数, 分别显著提高了 88.47%、12.98 倍和 6.42 倍。NPK 处理对全磷含量影响较小, 土壤有效磷含量和 PAC 值分别增加了 1.65 倍和 2.67 倍。CK 和 NK 处理全磷含量降低了 15.12% 和 32.67%, 有效磷含量降低了 33.47% 和 12.57%, 土壤磷活化系数 (PAC) 分别降低了 52.49% 和 2.55%。所有处理黑土磷库均以无机磷为主, 占全磷的 80.53%~90.43%。施磷肥处理的无机磷含量占全磷的比值显著高于不施磷处理, 对有机磷含量影响不显著。不同处理均以中活性态磷含量最多, 占全磷的 50.37%~55.06%, 活性态磷含量最少, 占全磷的 7.61%~19.02%。与不施磷处理相比, 施磷处理显著提高了土壤活性态磷的比值, 尤其是无机磷中的活性态磷的比值。CK、NK 处理中 Resin-P、NaHCO<sub>3</sub>-Pi、NaOH-Pi、Conc.HCl-Pi、Residual-P 无机磷形态均呈减少趋势; NPK 处理中 Resin-P、NaHCO<sub>3</sub>-Pi、NaOH-Pi、Dil.HCl-Pi 呈增加趋势, Conc.HCl-Pi 和 Residual-P 呈减少趋势; NPKM 处理中, 各无机态磷含量均随施肥年限的增加呈增加趋势。相关分析结果表明有效磷含量的变化值与 Resin-P、NaHCO<sub>3</sub>-Pi、NaOH-Pi、Conc.HCl-Pi 变化值之间存在显著的相关性, 其相关系数为 0.972、0.665、0.860 和 0.605, 说明活性较高的无机磷对有效磷效率的贡献最大。【结论】与施氮钾肥和氮磷钾肥相比, 氮磷钾配合有机肥可显著提高土壤全磷、有效磷含量, 显著提高土壤活性态无机磷的比例, 进而提高土壤磷活化系数, 提高磷素利用率。

**关键词:** 长期施肥; 黑土; 磷形态; 磷有效性

## Increment of soil phosphorus pool and activation coefficient through long-term combination of NPK fertilizers with manures in black soil

WANG Qiong<sup>1,2</sup>, ZHAN Xiao-ying<sup>1,3</sup>, ZHANG Shu-xiang<sup>1\*</sup>, PENG Chang<sup>4</sup>,  
GAO Hong-jun<sup>4</sup>, ZHANG Xiu-zhi<sup>4</sup>, ZHU Ping<sup>4</sup>, Colinet Gilles<sup>2</sup>

(1 Institute of Agricultural Resources and Regional Planning, Chinese Academy of Agricultural Sciences/National Engineering Laboratory for Improving Quality of Arable Land, Beijing 100081, China; 2 Gembloux Agro-Bio Tech, University of Liege, Passage des Déportés 2, 5030 Gembloux, Belgium; 3 Institute of Environment and Sustainable Development in Agriculture, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Beijing 100081, China; 4 Agricultural Environment and Resources Center, Jilin Academy of Agricultural Sciences, Changchun 130033, China)

**Abstract:** 【Objectives】Long-term fertilization affects soil phosphorus (P) fraction and availability. The change of soil P and P fractions contents and the availability of soil P under long-term different fertilization were

收稿日期: 2018-07-02 接受日期: 2018-08-16

基金项目: 国家自然科学基金项目 (41471249); 国家公益性行业 (农业) 科研专项 (201503120) 资助。

联系方式: 王琼 E-mail: wqcaas@gmail.com; \* 通信作者 张淑香 E-mail: zhangshuxiang@caas.cn

investigated, which will offer scientific support for P management in the black soil. **【 Methods 】** The used long-term fertilization experiment was started in 1990 on a black soil in Gongzhuling City, Jilin Province. The cropping system was continues mono maize. The selected four treatments included no fertilizer (CK), applying urea and potash sulfate (NK), applying urea, super-calcium phosphate and potash sulfate (NPK), and NPK plus pig manure (NPKM). For the three chemical fertilizer treatments, the corresponding inputs were N 165 kg/hm<sup>2</sup>, P 36 kg/hm<sup>2</sup> and K 68 kg/hm<sup>2</sup>. The pig manure input was 21 t/hm<sup>2</sup>, and the N-P-K input were 165-75-145 kg/hm<sup>2</sup>. Soil samples were collected for every five years (1990, 1995, 2000, 2005 and 2010). Using the Hedley sequential extraction method, the total P and Olsen-P and P fraction contents were measured, and the soil P activation coefficient(PAC) was calculated. **【 Results 】** With the extension of the experimental years, the soil total P and Olsen-P contents and PAC in treatments of CK and NK displayed downward trends, while those in NPK and NPKM showed upward trends. Compared with the beginning samples, the soil total P and Olsen-P contents and PAC in NPKM treatment were respectively increased by 88.47%, 12.98 and 6.42 times; and those were decreased by 15.12% and 32.67%, 33.47% in CK and by 12.57%, 52.49% and 2.55% in NK treatment; and the Olsen-P contents and PAC were respectively increased by 1.65 and 2.67 times, and the total P contents were not significantly increased in NPK. The inorganic P was increased significantly in NPK and NPKM treatments, while the organic P was not. The inorganic P was the main fraction of soil P in black soil, accounting for 80.53%–90.43% of the total P. Mid-labile P was the main fraction in the P pool of black soil, and accounted for 50.37%–55.06% of the total P, while labile P fraction accounted for 7.61%–19.02%. The ratio of labile P fraction in total P, especially in inorganic P, was increased significantly in NPK and NPKM treatments. Resin-P, NaHCO<sub>3</sub>-Pi, NaOH-Pi, Conc. HCl-Pi, Residual-P contents were decreased in CK and NK treatments, Resin-P, NaHCO<sub>3</sub>-Pi, NaOH-Pi, Dil.HCl-Pi contents were increased and Conc. HCl-Pi, Residual-P contents were decreased in NPK treatment, all inorganic P fractions were increased in NPKM treatment. The variation of Olsen-P was significantly correlated with the contents of Resin-P, NaHCO<sub>3</sub>-Pi, NaOH-Pi, Conc. HCl-Pi, and the coefficient was 0.972, 0.665, 0.860 and 0.605 in turn. **【 Conclusions 】** Long-term combined application of NPK fertilizers plus manure not only has caused the significant increase of total P, Olsen-P contents, but also increased the ratio of labile P to inorganic P, and increased the availability of soil P. Therefore, the combined application of NPK and manure is recommended for the effective improvement of P fertility in black soil.

**Key words:** long-term fertilization; black soil; phosphorus fraction; P availability

磷是作物生长的必需营养元素<sup>[1]</sup>, 对植物生长发育和生命活动发挥重要作用<sup>[2]</sup>。有效磷是土壤磷库中对作物最为有效的部分, 可直接被作物吸收利用, 表征土壤供磷能力<sup>[3]</sup>。由于作物对磷肥的当季利用率较低, 大约有 75%~85% 的磷素以难利用态积累在土壤中<sup>[4-5]</sup>。因此大量施肥后的土壤中并不缺少磷素, 而是缺少可被植物利用的磷素<sup>[6]</sup>。因此, 如何提高土壤中磷的有效性以及磷肥利用率对合理预测施用磷肥用量具有非常重要的作用。

活化土壤固定的和不易被植物吸收的磷素是提高磷肥利用率的主要途径<sup>[6]</sup>, 研究土壤磷形态的分布和转化对提高磷肥有效性具有重要意义。土壤中的磷包括溶液中的磷、吸附态磷(吸附在黏土矿物、有机物表面)、矿物态磷、有机磷化合物以及微生物态磷<sup>[7-8]</sup>, 各形态之间存在复杂的转化关系<sup>[9]</sup>。由 Hedley

提出<sup>[10]</sup>和 Tiessen 等<sup>[8]</sup>修正的连续浸提分级法可浸提 9 种不同形态的磷, 全面估计土壤中磷素状态<sup>[11-12]</sup>。Resin-P 和 NaHCO<sub>3</sub>-P (Pi + Po) 活性较高, 可被植物直接利用, 是土壤活性磷的主要成分, 称为活性态磷<sup>[11-13]</sup>, NaOH-P (Pi + Po) 和稀 HCl 浸提的 Dil.HCl-Pi 可通过解吸、风化等作用间接被植物利用吸收, 称为中活性态<sup>[11, 14]</sup>, 浓盐酸浸提的 Conc HCl-P (Pi + Po) 和 Residual-P 一般条件下极难被作物利用, 称为稳定态磷<sup>[16]</sup>。国内外关于施肥后土壤磷形态变化的研究已取得一定的进展<sup>[9, 15]</sup>, 水稻土长期单施化肥主要增加了 NaHCO<sub>3</sub>-Pi、NaOH-Pi 和 HCl-Pi 无机磷含量, 长期秸秆和绿肥配施无机肥料显著增加了 NaHCO<sub>3</sub>-P 和 NaOH-P 有机无机磷含量<sup>[16]</sup>, 而长期单施猪粪显著增加了土壤中 NaOH-Pi 含量, 降低了 Residual-P 含量<sup>[17]</sup>; 黑土连续 6 年施化学磷肥后, NaOH-P、HCl-

Pi 和 Residual-P 是土壤中的主要磷形态<sup>[18]</sup>, 此外, 不同土壤和施肥模式土壤磷形态与有效磷的响应也存在一定差异<sup>[19-20]</sup>。目前, 长期不同施肥模式下土壤磷形态变化及其有效性的影响研究较少, 东北黑土区土壤养分含量较高, 土壤理化性质良好, 适宜农业耕作, 是我国主要的粮食产区, 对国家的粮食安全战略具有重要的作用<sup>[21-22]</sup>。本文基于黑土长期定位试验(1990 年开始), 采用 Hedley 连续浸提法, 分析了不同施肥模式下耕层土壤中各形态磷的含量变化特征, 研究外源磷进入黑土后的转化及与土壤有效磷的相互关系, 为黑土合理施肥提供理论依据。

# 1 材料与方法

## 1.1 试验区概况

长期定位试验设在吉林省公主岭市中国农业科学院中层黑土土壤肥力和肥料效益长期定位试验基地(124°48'34"E, 43°30'23"N)。该区地势平坦, 海拔为 220 m, 属于温带大陆性季风气候区, 四季分明, 冬季寒冷漫长, 夏季温热短促, 年均降水量为 590.7 mm, 主要集中在 4~9 月作物生长季, 年均温为 4~5℃, 年积温 2800℃。土壤为中层典型黑土, 成土母质为第四季黄土状沉积物。试验区基础土壤耕层(0—20 cm)的基本性质为: 有机质 22.80 g/kg、全氮 1.40 g/kg、全磷 0.60 g/kg、全钾 23.80 mg/kg、有效磷 11.80 mg/kg、有效钾 190 mg/kg、容重 1.20 g/cm<sup>3</sup>, pH 7.60。

## 1.2 试验设计

长期定位试验始于 1990 年, 选五个典型历史年份(1990、1995、2000、2005 和 2010 年)。四个不同施磷处理: 不施肥对照(CK), 施氮、钾肥(NK), 平衡施氮、磷、钾肥(NPK), 氮磷钾+有机肥(NPKM)。试验不设重复, 每个小区多点取样, 弥补无重复的缺陷, 田间小区随机排列, 每个小区面积为 400 m<sup>2</sup>。

化学肥料氮磷钾肥分别为尿素、过磷酸钙和硫酸钾, 所有施氮处理的氮肥用量相同, 氮磷钾和有机肥处理中有机肥为猪粪, 其中的 C、N、P 和 K 养分的含量状况根据中国有机肥养分志(1999) 计算, 年施用量约为 23 t/hm<sup>2</sup> (磷含量约为 0.18%), 各处理具体用量见表 1。化肥和有机肥每年播种前一次性施入。供试作物为玉米连作, 一年一季。玉米品种在 1990—1993 年为丹育 13, 1994—1996 年为吉单 222, 1997—2005 年为吉单 209, 2005—2010 年为郑单 958, 于 4 月末播种, 9 月末收获, 按常规进行统一田间管理, 10 月份采用“S”形布点采集 5~7 点土壤样品, 充分混匀, 风干后进行分析和测定。

表 1 不同处理无机、有机肥氮磷钾用量  
(N-P-K, kg/hm<sup>2</sup>)

Table 1 Amount of inorganic and organic fertilizer dosage in each treatment

处理 Treatment	无机肥 Inorganic	猪粪 Pig manure
CK	0-0-0	
NK	165-0-68	
NPK	165-36-68	
NPKM	50-36-68	115-39-77

## 1.3 测定方法

参照《土壤农化分析》<sup>[23]</sup>中的方法测定 pH、容重、有机质、有效磷、速效钾等土壤理化性质。用 Hedley 连续浸提分级法进行磷组分含量测定<sup>[11]</sup>, 具体流程如图 1 所示。

## 1.4 计算与数据分析

1.4.1 土壤各无机磷形态含量的变化值(ΔPi) 计算公式:

$$\Delta Pi = Pin \text{ (mg/kg)} - Pio \text{ (mg/kg)}$$

式中: Pin 表示第 n 年的无机磷形态含量; Pio 表示 1990 年无机磷形态含量。

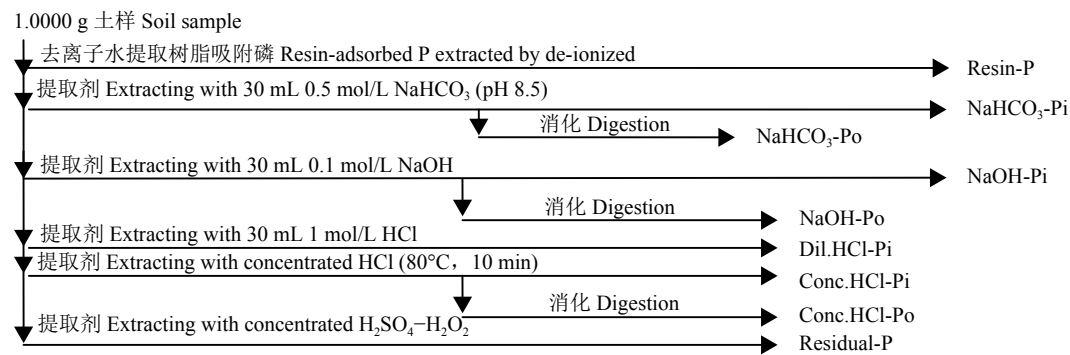


图 1 土壤磷的连续浸提试验  
Fig. 1 Sequential extraction of soil phosphorus

### 1.4.2 土壤磷活化系数 (PAC) 的计算公式:

$$\text{PAC} (\%) = \frac{\text{有效磷含量 (mg/kg)}}{\text{全磷含量 (g/kg)} \times 1000} \times 100$$

### 1.4.3 作物吸磷量及土壤-作物系统磷盈亏值的计算公式:

作物吸磷量 ( $\text{kg}/\text{hm}^2$ ) = 籽粒产量 ( $\text{kg}/\text{hm}^2$ ) × 籽粒含磷量 (%) + 秸秆产量 ( $\text{kg}/\text{hm}^2$ ) × 秸秆含磷量 (%)

土壤表观磷素盈亏 ( $\text{kg}/\text{hm}^2$ ) = 施入土壤磷素总磷 ( $\text{kg}/\text{hm}^2$ ) - 作物吸磷总磷 ( $\text{kg}/\text{hm}^2$ )

土壤累积磷盈亏 ( $\text{kg}/\text{hm}^2$ ) =  $\sum$  土壤表观磷盈亏 ( $\text{kg}/\text{hm}^2$ )

### 1.4.4 数据分析

本研究使用 Excel2016 和 Sigmaplot 12.5 进行数据的初步整理和作图, 采用 SPSS20 对数据进行差异显著性检验 (Duncan 法)。

## 2 结果分析

### 2.1 长期不同施肥模式下土壤全磷和有效磷的动态变化

长期不同施肥模式下土壤全磷的时间变化趋势呈明显差异 (图 2), 土壤不施磷肥和施化肥处理 (CK、NK、NPK) 土壤全磷处于耗竭状态, 呈缓慢下降趋势, 与初始含量相比, 土壤全磷含量分别降低了 15.12%、32.67% 和 7.58%, 各处理的全磷年减少速率约为 5.47、12.86、4.84  $\text{mg}/(\text{kg} \cdot \text{a})$ 。化肥配施有机肥 (NPKM) 处理全磷含量呈上升趋势, 与初始年份相比增加了 88.47%, 增加速率为 27.39  $\text{mg}/(\text{kg} \cdot \text{a})$ 。施肥 21 年后, NPKM 处理的土壤全磷是 CK、NK、NPK 处理的 2.28、2.51 和 1.99 倍。

由图 2 可知, 不施磷处理 (CK、NK) 土壤有效磷 (Olsen-P) 含量呈下降趋势, 与初始年份相比, 土壤有效磷含量分别降低了 33.47% 和 12.57%, 年减少

速率为 0.34 和 0.22  $\text{mg}/(\text{kg} \cdot \text{a})$ ; 施磷肥处理 (NPK、NPKM) 土壤 Olsen-P 含量均呈增加趋势, 与初始年份相比, Olsen-P 分别增加了 1.65 和 12.98 倍, 年增加速率为 0.81 和 8.10  $\text{mg}/(\text{kg} \cdot \text{a})$ 。施肥 21 年后, NPKM 处理的土壤 Olsen-P 含量是 CK、NK、NPK 处理的 21.43、16.56 和 5.38 倍。

由图 2 可知, 不同施磷肥处理的土壤磷活化系数 (PAC) 有显著差异。长期不施磷肥处理 (CK、NK), 土壤 PAC 呈降低趋势, 与初始值相比分别降低了 52.49% 和 2.55%。施磷肥处理 (NPK、NPKM), 随施肥年份的增加, 土壤 PAC 呈增加趋势, 与初始值相比分别增加了 2.67 和 6.42 倍。CK、NK、NPK、NPKM 处理多年平均 PAC 值分别为 1.04%、1.19%、3.38% 和 7.10%, 其中施磷肥处理显著高于不施磷处理, NPKM 处理的 PAC 值也显著高于 NPK 处理。

### 2.2 长期不同施肥模式对土壤磷形态的影响

2.2.1 不同施肥模式磷形态占全磷含量的比例 由图 3 可知, 黑土土壤磷库的组成以无机磷为主, 约占土壤磷总量的 80.53%~90.43%, 而有机磷相对维持在较低水平, 仅占土壤磷总量的 9.57%~19.47%。NK 处理无机磷与全磷的比值最小, NPKM 处理中最大, 两个处理之间具有显著性差异。不同施肥处理均以中活性态磷含量占全磷的比例最大, 为 50.37%~55.06%; 活性态磷含量占全磷比例最小, 为 7.61%~19.02%, NPKM 处理土壤活性态磷占全磷比值显著高于其他处理, 为 19.02%。

不同施肥处理下各形态磷占总无 (有) 机磷的比例不同。由图 4 可知, 土壤无机磷形态以中活性态和稳定态无机磷为主, 活性态无机磷占总无机磷比例最少, 约为 4.57%~19.95%, 土壤活性态无机磷占总无机磷的比例在施磷处理中显著优于不施磷处理 ( $P < 0.05$ ), 其中 NPKM 处理 (19.95%) 优于 NPK 处

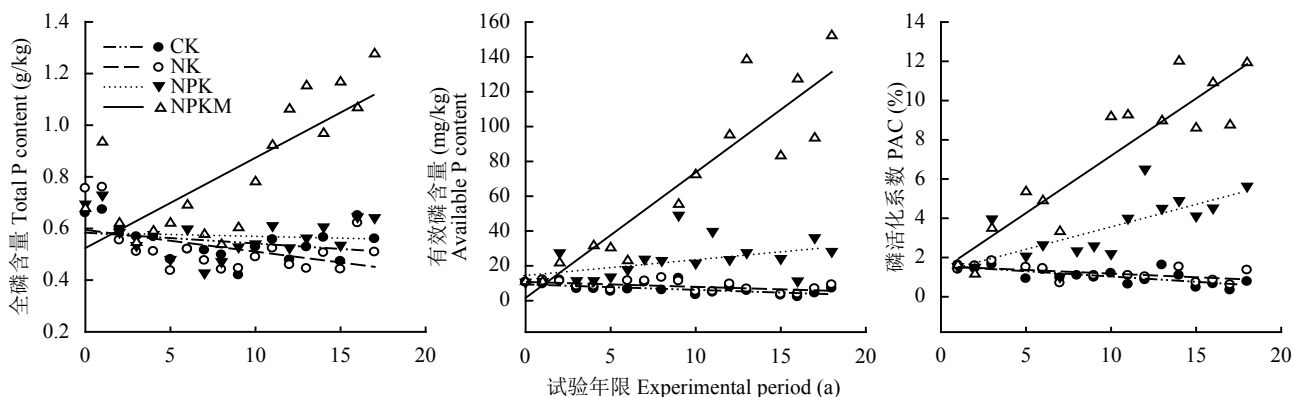


图 2 长期试验不同处理土壤全磷、有效磷含量和磷活化系数的变化

Fig. 2 Dynamics of soil total P, available P content and PAC in black soil under long-term fertilization



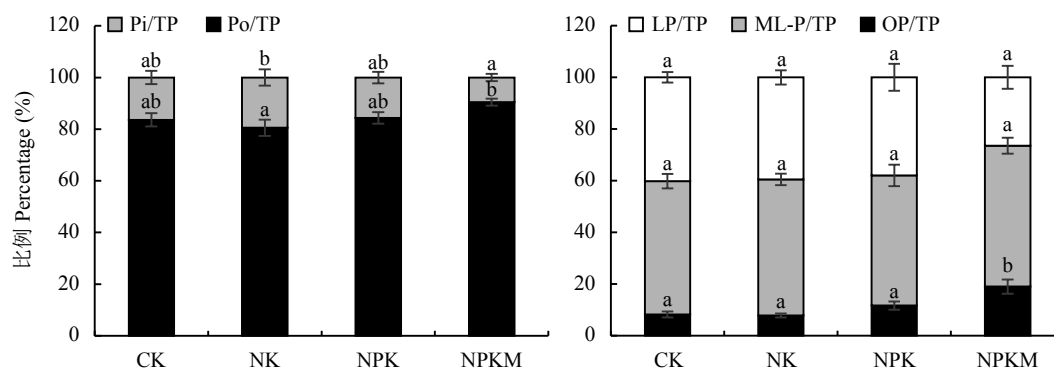


图3 长期不同施肥模式下土壤各形态磷在全磷中的百分比

Fig. 3 The ratio of each P fraction tototal P in black soil under long-term fertilization

[注 (Note): LP—活性态磷 Labile P; ML-P—中活性态磷 Mid-labile P; OP—稳定态磷 Occlude P. 方柱上不同字母表示处理间差异在 0.05 水平差异显著 Different letters above the bars indicate significant difference among the treatments at the 0.05 level.]

理 (10.33%) ( $P < 0.05$ ); 不同施肥模式稳定态磷占无机磷的比值为 26.70%~46.29%, 其 NPKM 处理比值最低, NK 处理最高, 两处理之间差异显著。土壤有机磷形态以中活性态有机磷含量最多, 占总有机磷的 57.97%~71.47%, 其比值 NK 处理最大, CK 处理最小, 两个处理之间有显著性差异 ( $P < 0.05$ ); 施磷肥后, 土壤活性态有机磷含量减少, 但各处理之间没有显著性差异。

2.2.2 无机磷形态含量变化 由图 5 可知, 随着施肥年限的增加, 不施磷肥处理 (CK、NK) Resin-P 含量逐渐减少, 其累积减少量呈逐渐增大的趋势, 与初始值相比, 试验 20 年后 CK、NK 处理的 Resin-P 的减少量分别为 3.74 和 13.14 mg/kg, 其浓度分别下降了 43.25% 和 71.38%。施磷肥处理后, 随着施磷年份的增加, Resin-P 含量有所提高, 累积增加量呈逐渐增大的趋势。与初始值相比, 试验 20 年后 NPK 与 NPKM 处理 Resin-P 增加量分别为 19.85 和 107.45 mg/kg, 其浓度分别增加了 98.82% 和 251.63%。

不施磷肥处理 (CK、NK) 的  $\text{NaHCO}_3\text{-Pi}$  累积减少量逐渐增加, 与初始值相比, 试验 20 年后 CK、NK 处理的  $\text{NaHCO}_3\text{-Pi}$  的减少量分别为 8.39 和 2.00 mg/kg, 其  $\text{NaHCO}_3\text{-Pi}$  浓度值较初始值分别下降 88.92% 和 31.63%。NPK 处理其变化量变化趋势不明显,  $\text{NaHCO}_3\text{-Pi}$  浓度稳定; NPKM 处理  $\text{NaHCO}_3\text{-Pi}$  变化值呈增加的趋势, 施肥第 10 年开始,  $\text{NaHCO}_3\text{-Pi}$  含量呈显著增加趋势, 施肥 20 年后  $\text{NaHCO}_3\text{-Pi}$  的浓度增加了 447.32%。

NaOH-Pi 含量变化与 Resin-P 有较一致的变化趋势。CK 和 NK 处理, NaOH-Pi 含量随时间变化, 其累积减少量呈逐渐增大的趋势; NPK 和 NPKM 两个处理的 NaOH-Pi 累积增加量呈逐渐增大的趋势。试验 20 年后, 与初始值相比, CK 和 NK 处理的 NaOH-Pi 减少了 26.60 和 17.64 mg/kg, 浓度下降了 79.82% 和 43.78%, NPK 和 NPKM 处理的 NaOH-Pi 增加了 49.99 和 106.24 mg/kg, 浓度上升了 182.55% 和 293.58%。

在 CK、NPK 和 NPKM 处理中, 土壤中  $\text{Dil.HCl-Pi}$  累积增加量呈逐渐增大趋势, NK 处理,  $\text{Dil.HCl-Pi}$

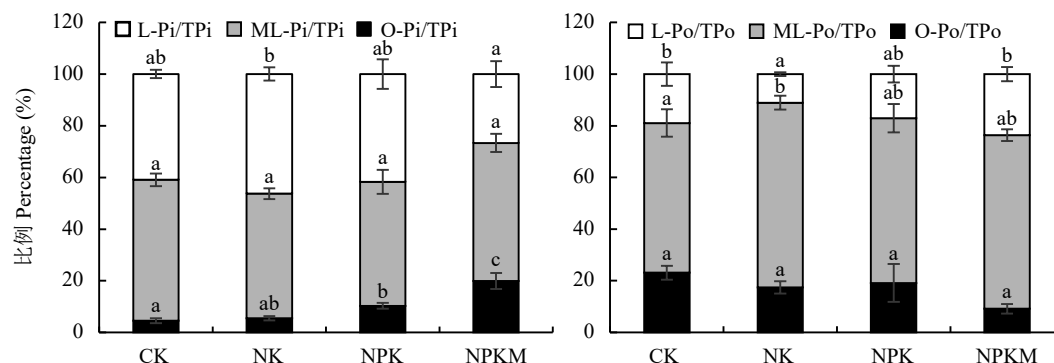


图4 长期不同施肥模式下土壤各形态磷占无机、有机磷的比例

Fig. 4 The ratio of P fraction in inorganic or organic P contents in black soil under long-term fertilization

[注 (Note): 方柱上不同字母表示处理间在 0.05 水平差异显著

Different letters above the bars indicate significant difference among the treatments at the 0.05 level.]

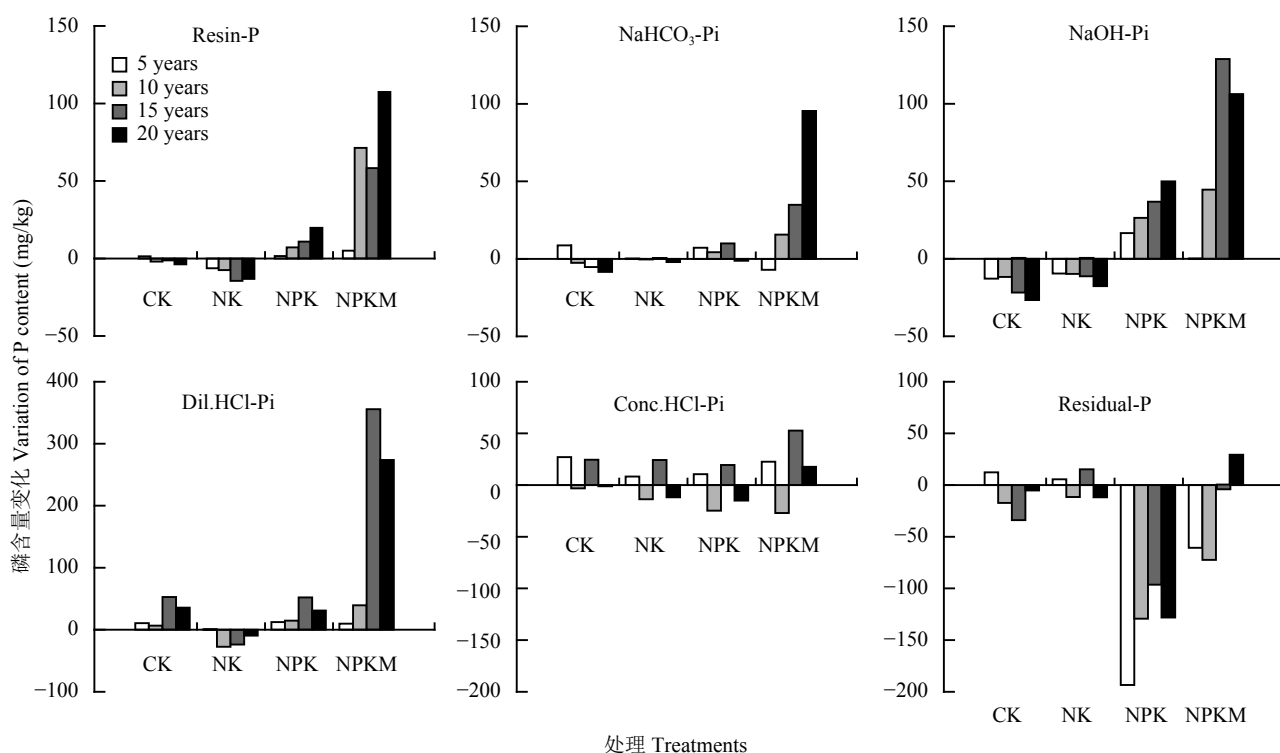


图 5 各处理施肥不同年限土壤无机磷形态含量

Fig. 5 Contents of inorganic P fractions in black soil after different fertilization years in each treatment

Pi 在施肥处理十年后减少量较大, 此后呈缓慢减小的趋势。试验 20 年后, CK、NPK 和 NPKM 浓度分别比施肥初始值提高了 35.64、30.87 和 273.76 mg/kg, NK 处理略有下降, 比初始值下降了 9.52 mg/kg。

四个处理 Conc.HCl-Pi 的变化量年间变化趋势一致。施肥 20 年, CK、NK 和 NPK 处理 Conc.HCl-Pi 浓度与 1990 年比各自降低了 3.95%、30.93%、32.61%; 而 NPKM 处理则提高了 54.54%。Residual-P 整体呈下降趋势, NPK 处理下降最为明显, 施肥 20 年后, CK、NK 和 NPK 处理分别比 1990 年降低了 4.91%、12.31% 和 56.46%, NPKM 处理增加了 17.87%。

2.2.3 有机磷形态含量变化 由图 6 可知, 施肥年份对土壤  $\text{NaHCO}_3\text{-Po}$  含量影响较小, 施肥的前 10 年, 随磷肥用量的增加, 土壤  $\text{NaHCO}_3\text{-Po}$  含量呈减小趋势, 施肥后 10 年, CK、NK 和 NPK 处理中土壤  $\text{NaHCO}_3\text{-Po}$  含量随磷肥用量的增加呈增加趋势, 而 NPKM 处理中  $\text{NaHCO}_3\text{-Po}$  含量变化不明显。与初始值相比, 施肥 20 年后 CK 处理中  $\text{NaHCO}_3\text{-Po}$  含量降低了 32.71%; 而 NK、NPK、NPKM 处理中  $\text{NaHCO}_3\text{-Po}$  含量分别提高了 36.82%、281.94% 和 53.09%。 $\text{NaOH-Po}$  的含量随施肥年份的增加呈“W”形趋势, 而在各处理间差异较小, 到 2010 年 CK、NK、

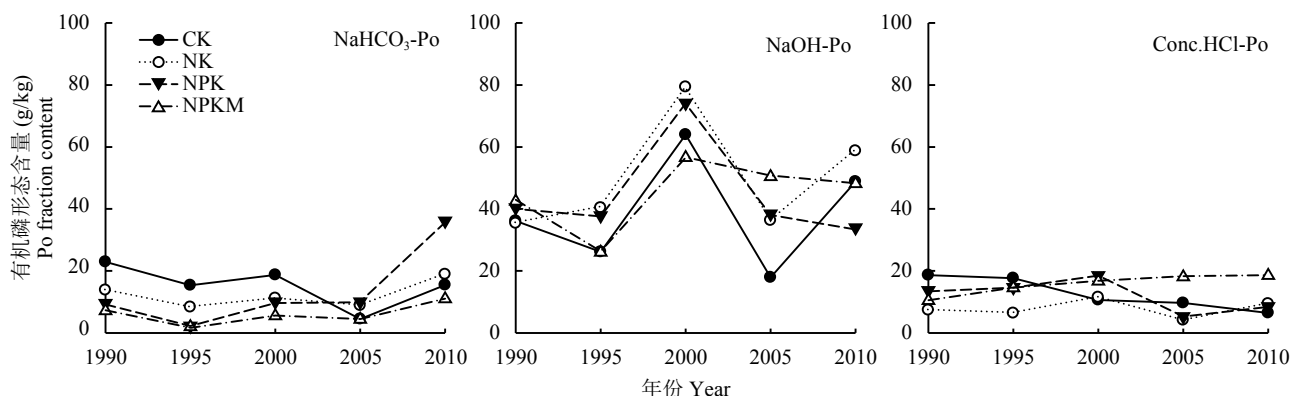


图 6 长期不同施肥处理土壤有机磷形态含量

Fig. 6 The content of organic P fractions in black soil under different fertilization treatment years

NPK 与 NPKM 处理 NaOH-Po 浓度比初始值提高了 46.67%、66.12%、75.26% 和 83.06%。施肥年份和施肥水平对 Conc.HCl-Po 含量影响较小, CK 处理的 Conc.HCl-Po 浓度为逐年下降, 施肥 20 年降低了 65.54%, NPKM 处理逐年上升, 施肥 20 年后比初始值增加了 76.66%。NK 与 NPK 处理 Conc.HCl-Po 含量年际间变化幅度相对较小, 与初始值相比, NK 处理提高了 28.18%, NPK 处理下降了 38.37%。

2.3 磷形态含量变化对土壤有效磷含量变化的影响

表 2 为土壤磷各形态变化值与 Olsen-P 变化值的相关性分析结果, 可以看出, 其中无机磷形态 Resin-P、NaHCO<sub>3</sub>-Pi、NaOH-Pi、Dil.HCl-Pi 变化量与 Olsen-P 变化值呈极显著正相关, 有机磷形态 Conc.HCl-Po 变化值与有效磷变化值呈显著正相关 ( $r = 0.605$ ), 磷素各形态变化值与土壤有效磷的变化值的相关性大小为  $\Delta \text{Resin-P} (0.972) > \Delta \text{NaOH-Pi} (0.860) > \Delta \text{Dil.HCl-Pi} (0.814) > \Delta \text{NaHCO}_3\text{-Pi} (0.665) > \Delta \text{Conc.HCl-Po} (0.605) > \Delta \text{NaHCO}_3\text{-Po} (0.262) > \Delta \text{Conc.HCl-Pi} (0.177) > \Delta \text{NaOH-Po} (-0.040) > \Delta \text{Residual-P} (-0.165)$ 。四种磷形态 (Resin-P, NaHCO<sub>3</sub>-Pi、NaOH-Pi、Dil.HCl-Pi) 之间也存在极显著相关性。

3 讨论

3.1 长期不同施肥模式对土壤有效磷演变特征的影响

土壤有效磷是反映土壤供磷能力的重要指标, 其含量的高低影响作物的吸磷水平, 并受土壤理化性质<sup>[3-4]</sup>, 自然因素, 施肥状况<sup>[24-25]</sup>等的影响。长期试

验结果表明, 不施磷肥的处理 (CK、NK) 土壤全磷和有效磷含量均呈耗竭状态。这是由于不施磷肥处理中, 土壤全磷主要来自成土母质, 作物携出磷是土壤磷的主要支出项<sup>[26]</sup>。此外, 自然因素如降水、土壤侵蚀等均可引起磷损失, 从而减少了土壤全磷和有效磷的含量。樊红柱等<sup>[27]</sup>在紫色水稻土, 陆欣春<sup>[28]</sup>等在黑土上的长期试验研究均发现不施磷肥降低了土壤全磷和有效磷的含量, 也验证了本试验结果。

长期施磷肥后均可提高有效磷的含量, 有机无机配施 (NPKM) 可显著提高土壤有效磷水平<sup>[14, 29-30]</sup>。本文研究结果表明, NPKM 处理的土壤全磷和有效磷含量分别是单施化肥 (NPK) 的 1.99 倍和 5.38 倍。黄晶等<sup>[24]</sup>的研究结果表明, 长期 NPKM 处理的土壤比单施化学磷肥处理更能提高 Olsen-P 含量, 这可能是由于磷素累积的影响 (图 7), 增加了土壤有效磷水平, 本文中 NPKM 处理中随施肥年限的增加, 土壤磷呈累积状态 (图 7), 此外有机无机配施 (NPKM) 处理中有机肥在分解过程中产生的有机酸可活化土壤本身的磷素, 使土壤中易溶态磷含量增加, 而有机肥中碳水化合物通过掩蔽土壤对磷素的吸附位, 增加土壤对磷的吸附饱和度, 降低了土壤对磷的吸附固定能力<sup>[31]</sup>。但在黄壤水稻土中, NPK 处理中有效磷含量的增加显著高于 NPKM 处理<sup>[32]</sup>, 沈浦<sup>[5]</sup>在水旱轮作地区的研究也得到相似结果, 与本试验结果相反, 这可能的原因是淹水条件下土壤中加入有机肥使土壤还原过程加剧, 增加了土壤中铁氧化物对磷的固定, 削弱了有机肥对土壤性质的改善<sup>[33-34]</sup>。

磷活化系数 (PAC) 是有效磷与全磷之比, 表征磷素的有效性, 活化系数越高, 土壤磷的有效性越高, 活性系数越低, 表明土壤固磷能力越强, 当

表 2 土壤有效磷变化量与各形态磷变化量的相关性  
Table 2 Relationship between Olsen-P and different P fractions

组分 Fraction	无机态磷组分 Inorganic P fraction						有机态磷组分 Organic P fraction		
	Resin-P	NaHCO <sub>3</sub> -Pi	NaOH-Pi	Dil.HCl-Pi	Conc.HCl-Pi	Residual-P	NaHCO <sub>3</sub> -Po	NaOH-Po	Conc.HCl-Po
NaHCO <sub>3</sub> -Pi	0.632**								
NaOH-Pi	0.852**	0.837**							
Dil.HCl-Pi	0.778**	0.935**	0.875**						
Conc.HCl-Pi	0.103	0.561*	0.272	0.535*					
Residual-P	-0.202	0.119	-0.297	0.021	0.296				
NaHCO <sub>3</sub> -Po	0.249	0.049	0.401	0.077	-0.402	-0.340			
NaOH-Po	-0.049	0.001	-0.038	-0.112	-0.599*	0.129	0.132		
Conc.HCl-Po	0.552*	0.495*	0.557*	0.407	-0.016	-0.112	0.146	0.250	
Olsen-P	0.972**	0.665**	0.860**	0.814**	0.177	-0.165	0.262	-0.040	0.605*

注 (Note): \*— $P < 0.05$ ; \*\*— $P < 0.01$ 。

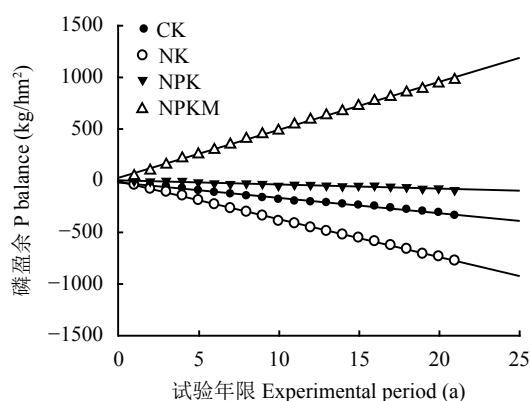


图 7 长期不同施肥模式下黑土磷素盈亏状况

Fig. 7 The balances of phosphorous in black soil under long-term different fertilization

PAC < 2% 时, 表明土壤全磷的转化率低, 有效磷容量和供给强度较小<sup>[24]</sup>。本研究, 不施磷肥处理, 土壤 PAC 值呈降低趋势, 可能是由于无外源磷投入, 作物从土壤中持续吸收磷素 (主要为有效磷), 土壤中有效磷含量降低, 而土壤中非有效态部分降低相对较少, 使得 PAC 值呈降低趋势<sup>[25]</sup>。施磷肥处理, 土壤 PAC 值均呈增加趋势, PAC > 2%, 这可能是由于 PAC 的变化受外源磷投入的影响, 外源磷投入量越大, 土壤 PAC 值增加越多<sup>[35-36]</sup>。鲁艳红等<sup>[25]</sup>对红壤土长期试验研究指出, NPK 处理土壤 PAC 平均值为 2.48%, 呈增加趋势, 与本文的结果相似。

### 3.2 长期不同施肥模式对土壤各磷形态含量变化的影响

不同施肥模式影响土壤磷形态的比值, 均以无机磷形态所占比值最大, 这表明无机磷是影响黑土磷供应能力的敏感磷源<sup>[37]</sup>。有机无机配施处理 (NPKM) 可显著增加土壤中无机磷库, 影响土壤无机磷的形态和分布, 促进无效态磷转化为有效态磷<sup>[38-39]</sup>, 在本试验中, NPKM 处理土壤无机磷占全磷的比值、活性态磷占全磷和活性态磷占无机磷的比值均优于其他处理, 也验证了这一结论。不施磷处理有机磷形态占全磷比值较施磷肥处理高, 其原因可能是由于土壤处于缺磷状态, 微生物与植物争夺土壤中的磷资源, 使无机磷固持在体内变为有机磷<sup>[40]</sup>, 此外, 无机磷比有机磷更容易被作物吸收利用, 也是无机磷减少的又一原因<sup>[33-34]</sup>。

树脂交换态磷 (Resin-P) 是与土壤溶液处于平衡状态的土壤固相无机磷<sup>[12]</sup>, 这部分磷对植物充分有效, 可被植物直接利用, 是土壤活性磷的大部分组成部分<sup>[7, 11, 13]</sup>。NaHCO<sub>3</sub>-Pi 吸附在土壤颗粒表面, 有效性较高, 可通过 HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>交换配体释放出, 易被作物吸收利用<sup>[41]</sup>。长期施用化学磷肥和有机无机配施均可

提高土壤中 Resin-P 含量, Shi<sup>[42]</sup>、Singh<sup>[43]</sup>等证明了施化学磷肥增加了 Resin-P 和 NaHCO<sub>3</sub>-Pi 含量, NPKM 处理中, Resin-P 和 NaHCO<sub>3</sub>-Pi 累积量显著高于 NPK 处理, 可能是因为有机无机配施处理增加了土壤有机质含量, 通过竞争作用减少土壤对磷的吸附, 使土壤中稳定态和闭蓄态磷向活性磷转化<sup>[44]</sup>。NaOH-Pi 主要是以化学吸附土壤 Fe、Al 化合物和粘粒表面的磷<sup>[14]</sup>, 其增加量在 NPK 处理中呈增加的趋势, 这是由于长期施磷肥后能够显著提高 Al-P、Fe-P 的绝对含量和相对含量<sup>[45]</sup>。而处理 NPKM 中, NaOH-Pi 的增加量不明显, 是由于在施用有机肥的条件下, 有机质与土壤颗粒通过铁、铝和钙桥键复合, 相应地降低了土壤中 Fe、铝和钙离子的浓度, 从而减少了这些离子对磷的固定<sup>[46]</sup>。石灰型磷 (Dil.HCl-P) 用稀 HCl 提取的无机磷, 是与钙结合的原生矿物态磷, 风化后可供植物利用<sup>[11, 47]</sup>, 本试验 NPKM 处理中, Dil.HCl-Pi (Ca-P) 含量变化值最大, 是因为黑土风化程度较低, 土壤中钙离子含量较高, 是土壤中磷存在的主要形态。Residual-P 一般条件下极难被植物利用。NPK 处理中 Residual-P 减少量最大, 这说明单施化肥不能完全作为作物吸磷的主要来源, 土壤中仍处于缺磷的状态, 促使稳定态的磷转化为活性较高的磷素。NPKM 处理在开始施入有机肥的时候, Residual-P 也处于减少状态, 原因可能是试验前期施肥量不能满足作物对磷的吸收利用, 促进了闭蓄态磷的转化; 也有可能是有机肥的施入促进土壤解磷微生物对闭蓄态磷等难溶性磷酸盐分解活化作用<sup>[48]</sup>。

## 4 结论

有机无机配施比单施化肥和不施磷肥更能显著提高土壤全磷、有效磷的含量。施磷肥处理中, 土壤磷活化系数 (PAC) 随试验时间的增加而增加; 在土壤中磷素盈余量相当的情况下, 有机无机配施比单施化肥更能提高土壤磷活化系数。不同施肥模式对土壤磷形态的变化影响不同, 施磷肥处理尤其是有机无机配施处理可显著提高土壤无机磷占全磷的比值, 尤其是活性态磷占无机磷的比值。通过分析表明, 长期施肥后, 有效磷变化值与 Resin-P、NaHCO<sub>3</sub>-Pi、NaOH-Pi、Conc.HCl-Po 变化值之间存在显著的相关性。

## 参考文献:

- [1] Daly K, Styles D, Lalor S, *et al.* Phosphorus sorption, supply potential and availability in soils with contrasting parent material and soil chemical properties[J]. *European Journal of Soil Science*, 2015, 66(4): 792-801.



- [2] 孙向阳. 土壤科学[M]. 北京: 中国林业出版, 2004: 16–19.  
Sun X Y. Soil Science[M]. Beijing: China Forestry Publishing House, 2004. 16–19.
- [3] 贾兴永, 李菊梅. 土壤磷有效性及其与土壤性质关系的研究[J]. 中国土壤与肥料, 2011, 11(6): 76–82.  
Jia X Y, Li J M. Study on soil phosphorus availability and its relation to the soil properties in 14 soils from different sites in China[J]. Soil and Fertilizer Sciences in China, 2011, 11(6): 76–82.
- [4] 沈浦. 长期施肥下典型农田土壤有效磷的演变特征及机制[D]. 北京: 中国农业科学院博士学位论文, 2014.  
Shen P. Evolution characteristics and mechanisms of soil available phosphorus in typical croplands under long-term fertilization[D]. Beijing: PhD Dissertation of Chinese Academy of Agricultural Sciences, 2014.
- [5] Zhang C, Tian H, Liu J, *et al.* Pools and distributions of soil phosphorus in China[J]. Global Biogeochemical Cycles, 2005, 19(1): 35–44.
- [6] 陈欣. 长期施用有机肥对黑土磷素形态及有效性的影响[D]. 哈尔滨: 东北农业大学硕士学位论文, 2012.  
Chen X. Effect of long-term application of organic manure on phosphorus characteristics and availability in black soil[D]. Harbin: MS Thesis of Northeast Agricultural University, 2012.
- [7] 孙桂芳, 金继运, 石元亮. 土壤磷素形态及其生物有效性研究进展[J]. 中国土壤与肥料, 2011, (2): 1–9.  
Sun G F, Jin J Y, Shi Y L. Research advance on soil phosphorous forms and their availability to crops in soil[J]. Soil and Fertilizer Sciences in China, 2011, (2): 1–9.
- [8] Tiessen H, Moir J O. Characterization of available P by sequential extraction[A]. Carter M R, Gregorich E G. Soil sampling and methods of analysis (2nd)[M]. Boca Raton, FL, USA: CRL Press, 2007. 293–306.
- [9] 张林, 吴宁, 吴彦, 等. 土壤磷素形态及其分级方法研究进展[J]. 应用生态学报, 2009, 20(7): 1775–1782.  
Zhang L, Wu N, Wu Y, *et al.* Soil phosphorus form and fractionation scheme: A review[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2009, 20(7): 1775–1782.
- [10] Hedley M J, Stewart J W B, Changes B S. Changes in inorganic and organic soil phosphorus fractions induced by cultivation practices and by laboratory incubations[J]. Soil Science Society of America Journal, 1982, 46: 970–976.
- [11] Yang X, Post W M. Phosphorus transformations as a function of pedogenesis: A synthesis of soil phosphorus data using Hedley fractionation method[J]. Biogeosciences, 2011, 8(10): 2907–2916.
- [12] 许艳, 张仁陟, 张冰桥, 等. 保护性耕作对黄土高原旱地土壤总磷及组分的影响[J]. 水土保持学报, 2016, 30(4): 254–260.  
Xu Y, Zhang R S, Zhang B Q, *et al.* Effects of conservation tillage on soil total phosphorus and phosphorus fractions of dry land in the Loess Plateau[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2016, 30(4): 254–260.
- [13] Tiessen H, Stewart J W B, Cole C V. Pathways of phosphorus transformations in soils of differing pedogenesis[J]. Soil Science Society of America Journal, 1984, 48: 853–858.
- [14] Zhang T Q, Mackenzie A F, Liang B C, *et al.* Soil Test phosphorus and phosphorus fractions with long-term phosphorus addition and depletion[J]. Soil Science Society of America Journal, 2004, 63: 519–528.
- [15] 张林, 吴彦, 吴宁, 等. 林线附近主要植被类型下土壤非生长期磷素形态[J]. 生态学报, 2010, 30(13): 3457–3464.  
Zhang L, Wu Y, Wu N, *et al.* The soil phosphorus forms under different vegetation types near timberline during non-growing season[J]. Acta Ecologica Sinica, 2010, 30(13): 3457–3464.
- [16] Li Y Y, Yang R, Gao R, *et al.* Effects of long-term phosphorus fertilization and straw incorporation on phosphorus fractions in subtropical paddy soil[J]. Journal of Integrative Agriculture, 2015, 14(2): 365–373.
- [17] Yan X, Wei Z, Hong Q, *et al.* Phosphorus fractions and sorption characteristics in a subtropical paddy soil as influenced by fertilizer sources[J]. Geoderma, 2017, 295: 80–85.
- [18] Ciampitti I A, Picone L I, Rubio G, *et al.* Pathways of phosphorous fraction dynamics in field crop rotations of the pampas of Argentina[J]. Soil Science Society of America Journal, 2011, 75(3): 918.
- [19] Audette Y, O'Halloran I P, Paul V R. Kinetics of phosphorus forms applied as inorganic and organic amendments to a calcareous soil[J]. Geoderma, 2016, 262: 119–124.
- [20] 王艳玲, 王杰, 赵兰坡, 等. 黑土无机磷形态及其有效性研究[J]. 水土保持学报, 2004, 18(3): 85–89.  
Wang Y L, Wang J, Zhao L P, *et al.* Study on forms of inorganic phosphates and their usefulness in black soils in Jilin Province[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2004, 18(3): 85–89.
- [21] 初振东, 谢瑞芝, 李少昆, 等. 东北春玉米耐老化膜覆盖及留高茬交替休闲保护性耕作效应研究[J]. 玉米科学, 2010, (2): 70–72.  
Chu Z D, Xie R Z, Li S K, *et al.* Spring corn conservation tillage' effects of the ageing-resistant film mulch and the alternative fallow remaining high stubble in northeast of China[J]. Journal of Maize Sciences, 2010, (2): 70–72.
- [22] 康日峰, 任意, 吴会军, 等. 26年来东北黑土区土壤养分演变特征[J]. 中国农业科学, 2016, (11): 2113–2125.  
Kang R F, Ren Y, Wu H J, *et al.* Changes in the nutrients and fertility of black soil over 26 years in northeast China[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2016, (11): 2113–2125.
- [23] 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法[M]. 北京: 中国农业科技出版社, 2000.  
LU R K. Analytical method of soil and agro-chemistry[M]. Beijing: China Agricultural Science and Technology Press. 2000.
- [24] 黄晶, 张杨珠, 徐明岗, 等. 长期施肥下红壤性水稻土有效磷的演变特征及对磷平衡的响应[J]. 中国农业科学, 2016, 49(6): 1132–1141.  
Huang J, Zhang Y Z, Xu M G, *et al.* Evolution characteristics of soil available phosphorus and its response to soil phosphorus balance in paddy soil derived from red earth under long-term fertilization[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2016, 49(6): 1132–1141.
- [25] 鲁艳红, 廖育林, 聂军, 等. 长期施肥红壤性水稻土磷素演变特征及对磷盈亏的响应[J]. 土壤学报, 2017, 54(6): 1471–1483.  
Lu Y H, Liao Y L, Nie J, *et al.* Evolution of soil phosphorus in reddish paddy soil under long-term fertilization varying in formulation and its response to P balance[J]. Acta Pedologica Sinica, 2017, 54(6): 1471–1483.
- [26] 曲均峰, 李菊梅, 徐明岗, 等. 长期不施肥条件下几种典型土壤全磷和 Olsen-P 的变化[J]. 植物营养与肥料学报, 2008, 14(1): 90–98.  
Qu J F, Li J M, Xu M G, *et al.* Total-P and Olsen-P dynamics of

- long-term experiment without fertilization[J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2008, 14(1): 90–98.
- [27] 樊红柱, 陈庆瑞, 郭松, 等. 长期不同施肥紫色水稻土磷的盈亏及有效性[J]. *植物营养与肥料学报*, 2018, (1): 154–162.
- Fan H Z, Chen Q R, Guo S, *et al.* Phosphorus balance and availability in a purple paddy soil under long-term different fertilization[J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2018, (1): 154–162.
- [28] 陆欣春, 邹文秀, 韩晓增, 等. 长期施肥对黑土磷和锌形态转化的影响[J]. *植物营养与肥料学报*, 2015, 21(6): 1536–1542.
- Lu X C, Zou W X, Han X Z, *et al.* Effect of long-term fertilization on phosphorus and zinc fractions in a Mollisol[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizer*, 2015, 21(6): 1536–1542.
- [29] 徐明岗, 于荣, 王伯仁. 土壤活性有机质的研究进展[J]. *土壤肥料*, 2000, (6): 3–7.
- Xu M G, Yu R, Wang B R. Progress on the study of soil active organic matter[J]. *Soils and Fertilizers*, 2000, (6): 3–7.
- [30] 孙好. 长期定位施肥对红壤肥力及作物的影响[D]. 福州: 福建农林大学, 2009.
- Sun H. Effect of long-term fertilization on the red soil fertility and crop[D]. Fuzhou: MS Thesis of Fujian Agriculture and Forestry University, 2009.
- [31] 戚瑞生, 党廷辉, 杨绍琼, 等. 长期轮作与施肥对农田土壤磷素形态和吸持特性的影响[J]. *土壤学报*, 2012, 49(6): 1136–1146.
- Qi R S, Dang T H, Yang S Q, *et al.* Forms of soil phosphorus and P adsorption in soils under long-term crop rotation and fertilization systems[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2012, 49(6): 1136–1146.
- [32] 刘彦伶, 李渝, 张雅蓉, 等. 长期施肥对黄壤性水稻土磷平衡及农学阈值的影响[J]. *中国农业科学*, 2016, 49(10): 1903–1912.
- Liu Y L, Li Y, Zhang Y R, *et al.* Effect of long-term fertilization on the p balance and critical value of soil Olsen-P in paddy soil from yellow earth[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2016, 49(10): 1903–1912.
- [33] 章永松, 林威永, 罗安程, 等. 有机肥(物)对土壤中磷的活化作用及机理研究1. 有机肥(物)对土壤不同形态无机磷的活化作用[J]. *植物营养与肥料学报*, 1998, 4(2): 145–150.
- Zhang Y S, Lin X Y, Luo A C, *et al.* Studies on activation of phosphorus by organic manure soils and its mechanisms. 1. Effect of organic manure (matter) on activation to different phosphate in soils[J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 1998, 4(2): 145–150.
- [34] 杨长明, 杨林章, 颜廷梅, 等. 不同养分和水分管理模式对水稻土质量的影响及其综合评价[J]. *生态学报*, 2004, 24(1): 63–70.
- Yang C M, Yang L Z, Yan T M, *et al.* Effects of nutrient and water regimes on paddy soil quality and its comprehensive evaluation in the Taihu Lake Region[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2004, 24(1): 63–70.
- [35] 张英鹏, 陈清, 李彦, 等. 不同磷水平对山东褐土耕层无机磷形态及磷有效性的影响[J]. *中国农学通报*, 2008, 24(7): 245–248.
- Zhang Y P, Chen Q, Li Y, *et al.* Effect of phosphorus levels on form and bioavailability of inorganic P in ploughlayer of cinnamon soil in Shandong Province[J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2008, 24(7): 245–248.
- [36] 陈波浪, 盛建东, 蒋平安. 两种磷肥对棉田土壤磷素有效性及吸收分配的影响[J]. *新疆农业大学学报*, 2009, 32(4): 17–21.
- Chen B L, Sheng J D, Jiang P A. Effect of two types of phosphates on phosphorus efficiency and phosphorus absorption and distribution in cotton field[J]. *Journal of Xinjiang Agricultural University*, 2009, 32(4): 17–21.
- [37] 张鑫, 谷会岩, 陈祥伟. 择伐干扰对小兴安岭阔叶红松林土壤磷形态及有效性的影响[J]. *应用生态学报*, 2018, 29(2): 441–448.
- Zhang X, Gu H Y, Chen X Y. Effects of selective cutting on soil phosphorus forms and availability in Korean pine broadleaved forest in Xiaoxing'anling Mountains of China[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2018, 29(2): 441–448.
- [38] 卢志红, 嵇素霞, 张美良, 等. 长期定位施肥对水稻土磷素形态的影响[J]. *植物营养与肥料学报*, 2009, 15(5): 1065–1071.
- Lu Z H, Ji S X, Zhang M L, *et al.* Influence of long-term localized fertilization on phosphorus forms in paddy soil[J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2009, 15(5): 1065–1071.
- [39] 张邦喜, 李渝, 张文安, 等. 长期施肥对黄壤养分及不同形态无机磷的影响[J]. *灌溉排水学报*, 2016, (5): 33–37.
- Zhang B X, Li Y, Zhang W A, *et al.* Effect of long-term fertilization on nutrients and inorganic phosphorus forms in yellow soil[J]. *Journal of Irrigation and Drainage*, 2016, (5): 33–37.
- [40] 展晓莹. 长期不同施肥模式黑土有效磷与磷盈亏响应关系差异的机理[D]. 北京: 中国农业科学院博士学位论文, 2016.
- Zhan X Y. Relationship between available phosphorus and phosphorus balance and its mechanism under different long-term fertilizations in black soil[D]. Beijing: PhD Dissertation of Chinese Academy of Agricultural Sciences, 2016.
- [41] Verma S, Subehia S K, Sharma S P. Phosphorus fractions in an acid soil continuously fertilized with mineral and organic fertilizers[J]. *Biology and Fertility of Soils*, 2005, 41(4): 295–300.
- [42] Shi Y, Ziadi N, Messiga A J, *et al.* Changes in soil phosphorus fractions for along-term corn-soybean rotation with tillage and phosphorus fertilization[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 2013, 77(4): 1402–1412.
- [43] Singh M, Tripathi A K, Reddy K S, *et al.* Soil phosphorus dynamics in a Vertisol as affected by cattle manure and nitrogen fertilization in soybean-wheat system[J]. *Plant Nutrition and Soil Science*, 2001, 164: 691–696.
- [44] Tiecher T, Gomes M V, Ambrosini V G, *et al.* Assessing linkage between soil phosphorus forms in contrasting tillage systems by path analysis[J]. *Soil and Tillage Research*, 2018, 175: 276–280.
- [45] 陈欣, 韩晓增, 宋春, 等. 长期施肥对黑土供磷能力及磷素有效性的影响[J]. *安徽农业科学*, 2012, 40(6): 3292–3294, 3333.
- Chen X, Han X Z, Song C, *et al.* Effects of long-term fertilization on phosphorus supply capacity and availability in black soil[J]. *Journal of Anhui Agricultural Sciences*, 2012, 40(6): 3292–3294, 3333.
- [46] Fink J R, Inda A V, Tiecher T, *et al.* Iron oxides and organic matter on soil phosphorus availability[J]. *Ciência e Agrotecnologia*, 2016, 40(4): 369–379.
- [47] Cross Fernald A, Schlesinger W H. A literature review and evaluation of the Hedley fractionation: Applications to the biogeochemical cycle of soil phosphorus in natural ecosystems[J]. *Geoderma*, 1995, 64(3): 197–214.
- [48] 滕泽栋, 李敏, 朱静, 等. 解磷微生物对土壤磷资源利用影响的研究进展[J]. *土壤通报*, 2017, 48(1): 229–235.
- Teng Z D, Li M, Zhu J, *et al.* Research advances in effect of phosphate solubilizing microorganisms on soil phosphorus resource utilization[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2017, 48(1): 229–235.